

## ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА Й ЕЛЕКТРОННА ТЕХНІКА, СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 656.052.002.5(045)

В. А. Швець, к.т.н., доц., О. В. Швець

### ПІДХОДИ ЩОДО ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ В ЗОНІ АЕРОПОРТУ

Національний авіаційний університет, Київ, Україна, e-mail: hvan@nua.edu.ua

*У роботі для отримання відношення "сигнал/завада", яке забезпечує виконання функцій глобальних навігаційних супутникових систем, пропонується використовувати статистичні методи аналізу електромагнітної обстановки в зоні аеропорту, яка є зоною ненавмисних завад з дуже небезпечним рівнем.*

**Ключові слова:** глобальна навігаційна супутникова система, завада, статистична гіпотеза, GPS, ГЛОНАСС.

#### Вступ

Приймачі споживачів навігаційної інформації глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) потенційно піддані впливу перешкод, які можуть приводити до заборони виявлення сигналу й до зриву його супроводу, до захватів неправильних сигналів і до помилок виміру навігаційних параметрів. В остаточному підсумку дія перешкод приводить або до зриву рішення навігаційного завдання, або до появи помилок навігації, що перевищують вимоги споживачів.

Тому актуальною є задача отримання відношення "сигнал/завада", при якому ГНСС ще спроможна виконувати своє основне завдання – забезпечення користувача навігаційною інформацією.

Отримання відношення "сигнал/завада" для приймачів ГНСС можна розглядати як статистичну задачу оцінки електромагнітної обстановки в окремій зоні дії декількох радіоелектронних засобів (РЕЗ), які можуть випромінювати навмисні або ненавмисні завади.

#### Основна частина

На території сучасного аеропорту розташоване більш ста радіоелектронних засобів (РЕЗ) різного призначення, що працюють у діапазоні частот від 0,15 МГц до 9400 МГц. Тому територія аеропорту є зона ненавмисних завад з дуже небезпечним рівнем. Щоб забезпечити надійне функціонування ГНСС необхідно оцінити мінімальне відношення між сигналом та завадою з точки зору електромагнітної сумісності.

Електромагнітна обстановка (ЕМО) у точці спостереження може бути сприятливою для одного рецептора і несприятливою для іншого. Тому кількісна оцінка ЕМО є індивідуальною для окремого рецептора. Вона визначається чутливістю рецептора до корисного сигналу і його сприйнятливостю до завади.

Для забезпечення або оцінки електромагнітної сумісності (ЕМС) конкретного РЕЗ з іншими джерелами радіосигналів, доцільно розглянути окремі гіпотези (сценарії), що можуть виникнути при одночасному функціонуванні декількох незалежних РЕЗ.

Припустимо, що наші інтереси пов'язані з забезпеченням нормального функціонування системи  $A$  (супутникова навігаційна система GPS, ГЛОНАСС, ГАЛІЛЕО), приймальна антена якої знаходиться під впливом випромінювань (радіозавад) з боку незалежних систем  $B$  і  $C$ . Системи  $B$  і  $C$  можна розглядати як угруповання незалежних РЕЗ. Розподіл одночасно діючих систем на групи  $A$  і  $B$  пов'язане з тим, що такий ефект, як різницева інтермодуляція третього порядку виникає при дії на нелінійний елемент, що знаходиться на антені радіопередавача або знаходиться поза антеною радіоприймача системи  $C$ , не менш двох радіозавад.

Принцип формування ЕМО в точці  $A$  ілюструється графом, зображеним на рис. 1. На цьому ж графі відображений формальний вплив систем  $A$  на ЕМО в точках розміщення рецепторів (антен) систем  $B$  та  $C$ .

На основі цього графа можна побудувати простір простих гіпотез  $H_i \in H$ , що характеризують можливий стан ЕМО в точці розміщення рецептора системи  $A$ . Гіпотези (сценарії)  $H_i$  можна розглядати як можливу реалізацію незалежних подій. На основі графа будуюмо простір  $H$  гіпотез  $H_i$ , характеризуючи наявність кожної з подій – випромінювань з боку систем  $A$ ,  $B$  та  $C$  одиничним вектором у тривимірному декартовому просторі. При цьому в обраній системі координат  $[A, B, C]$  на першому місці зображена вісь  $A$ , яка відповідає функціонуванню системи, з якою пов'язані наші інтереси. На одинич-

них векторах  $A$ ,  $B$  і  $C$  як на ребрах будуюмо куб гіпотез (рис. 2).

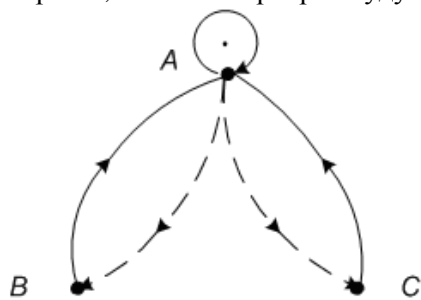


Рис. 1. Граф формування ЕМО

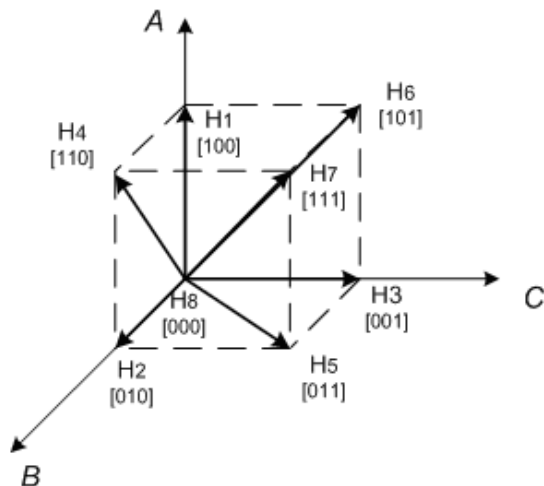


Рис. 2. Простір  $H$  гіпотез  $H_i$

Простими гіпотезами є проміні (вектори), які з'єднують початок координат з вершинами кубу. Кожна з гіпотез відображається вектором, у якого координати кінця надаються у виді трипозиційного коду, що відповідає правилу циклічного перестановлення векторів.

Отримаємо повну групу подій (випадкових) з восьми гіпотез, які характеризують ЕМО і кожна з котрих має певний фізичний зміст. Цей зміст визначається наявністю вектора та просторовим положенням його кінця, яке подається адресним кодом, що розшифрується у таблиці 1.

Гіпотеза  $H_0$  відповідає випадку, коли система  $A$  знаходиться в режимі очікування – корисний сигнал відсутній, відсутні також випромінювання з боку систем  $B$  і  $C$ .

Гіпотезі  $H_1$  відповідає ідеальна ЕМО, при якій система  $A$  не зазнає впливу завад з боку систем  $B$  і  $C$ .

Гіпотезам  $H_2$  і  $H_3$  відповідають випадки, при яких на систему  $A$ , що знаходиться в режимі очікування, впливає завада або з боку системи  $B$ , або з боку системи  $C$ . Кожна з цих завад може впливати на систему  $A$  по основному або неосновним каналам приймання і привести до ситуації, яка відома як "хибна тривога".

Таблиця 1

Зміст гіпотез

Номер гіпотези	Визначення гіпотези	Код гіпотези	Інтерпретація гіпотези
0	$H_0$	000	Корисний сигнал відсутній, відсутні також випромінювання з боку систем $B$ і $C$
1	$H_1$	100	Система функціонує при відсутності завад з боку систем $B$ і $C$
2	$H_2$	010	Корисний сигнал відсутній, система $A$ знаходиться під впливом завади лише з боку системи $B$
3	$H_3$	001	Корисний сигнал відсутній, система $A$ знаходиться під впливом завади лише з боку системи $C$
4	$H_4$	110	Крім корисного сигналу на систему $A$ впливає завада з боку системи $B$
5	$H_5$	101	Крім корисного сигналу на систему $A$ впливає завада з боку системи $C$
6	$H_6$	011	Корисний сигнал відсутній, система $A$ знаходиться під одночасним впливом завад з боку систем $B$ і $C$
7	$H_7$	111	Крім корисного сигналу на систему $A$ впливають випромінювання з боку систем $B$ і $C$
8	$H_8$	000	Система $A$ в режимі очікування (корисний сигнал відсутній), завади з боку $B$ і $C$ - відсутні

Гіпотезам  $H_4$  і  $H_5$  відповідають ситуації, при яких на систему  $A$  крім корисного сигналу впливає завада з боку або системи  $B$ , або з боку системи  $C$ . Кожна з цих завад може привести до ефекту блокування, перехресних викривлень або інтермодуляції. Крім того можливе виникнення ситуації, відомої як "пропущення цілі". В цифрових системах можливе виникнення "збоїв".

Гіпотеза  $H_6$  відповідає ситуації, при якій на систему  $A$ , що знаходиться у режимі очікування, одночасно впливають завади з боку систем  $B$  та  $C$ . При цьому в системі  $A$  може виникнути ефекти інтегрування та “хвиної тривоги”.

Гіпотеза  $H_7$  відповідає випадку, при якому на систему  $A$ , окрім корисного сигналу, одночасно впливають завади з боку систем  $B$  та  $C$ . При цьому в системі  $A$  можливе виникнення будь-якого з нелінійних ефектів, ефекти типу “хвиної тривоги”, “пропущення цілі”, збої в роботі цифрових елементів.

Випромінювання пристроїв системи  $A$  в свою чергу можуть впливати на якість ЕМО в точках розміщення рецепторів систем  $B$  і  $C$ . Для цих систем можна побудувати аналогічні простори простих гіпотез і виявити можливі ситуації, в яких може опинитися кожна з систем. Оцінимо імовірність реалізації кожної з восьми гіпотез.

Апостеріорна імовірність гіпотези  $H_i$  при умові, що система  $A$  реалізує свою цільову функцію  $\mathcal{C}_A$ , визначається формулою Байєса:

$$P(H_i / \mathcal{C}_A) = \frac{P(H_i) \cdot P(\mathcal{C}_A / H_i)}{P(\mathcal{C}_A)}, \quad (1)$$

де повна імовірність досягнення цілі системою  $A$ :

$$P(\mathcal{C}_A) = \sum_{i=1}^8 P(H_i) \cdot P(\mathcal{C}_A / H_i), \quad (2)$$

а  $P(H_i)$  – апіорна імовірність реалізації гіпотези  $H_i$ .

З аналогії визначимо імовірність здійснення альтернативної гіпотези  $\overline{H}_i$ , яка розглядається як повна група подій, що не містить гіпотезу  $H_i$ , при умові, що ціль  $\mathcal{C}_A$  досягається:

$$P(\overline{H}_i / \mathcal{C}_A) = \frac{P(\overline{H}_i) \cdot P(\mathcal{C}_A / \overline{H}_i)}{P(\mathcal{C}_A)}, \quad (3)$$

$$P(\overline{H}_i) = 1 - P(H_i), \quad (4)$$

На основі виразів (1) – (4) визначимо відношення правдоподібності гіпотез:

$$\Pi = \frac{P(H_i / \mathcal{C}_A)}{P(\overline{H}_i / \mathcal{C}_A)} = \frac{P(H_i / \mathcal{C}_A)}{1 - P(H_i / \mathcal{C}_A)}, \quad (5)$$

Визначимо поріг  $Q$ , з яким необхідно порівнювати відношення правдоподібності  $\Pi$  (2.5) при оцінюванні якості електромагнітної обстановки. Цей поріг доцільно визначити як стандартну процедуру експертних оцінок, які характеризують втрати  $\Lambda_{kl}$ , що супроводжують прийняття правильних, а також неправильних рішень при оцінюванні правильних або неправильних в даній ситуації гіпотез. Індекс  $k$  відноситься до виду гіпотез, а індекс  $l$  – до виду рішення по правильності або неправильності рішення гіпотези. При цьому індекси  $k$  та  $l$  замінюють індексами “1”, якщо гіпотеза або рішення є правильними, й індексом “0”, якщо гіпотеза або рішення є неправильними. Наприклад,  $\Lambda_{11}$  – втрати, що супроводжують прийняття правильної гіпотези як правильної,  $\Lambda_{00}$  – неправильної гіпотези як неправильної,  $\Lambda_{10}$  – правильної гіпотези як неправильної,  $\Lambda_{01}$  – неправильної гіпотези як правильної.

Оцінимо значення середнього ризику при прийнятті правильного рішення відносно існування гіпотези  $H_i$ :

$$R_{i1} = \Lambda_{11}(H_i / \mathcal{C}_A) \cdot P(H_i / \mathcal{C}_A) + \Lambda_{10}(\overline{H}_i / \mathcal{C}_A) \cdot P(\overline{H}_i / \mathcal{C}_A) \quad (6)$$

і значення середнього ризику при прийнятті неправильного рішення відносно тієї ж самої гіпотези:

$$R_{i0} = \Lambda_{00}(\overline{H}_i / \mathcal{C}_A) \cdot P(\overline{H}_i / \mathcal{C}_A) + \Lambda_{01}(H_i / \mathcal{C}_A) \cdot P(H_i / \mathcal{C}_A) \quad (7)$$

Припустимо, що втрати від прийняття неправильних рішень перевищують втрати, якими супроводжуються прийняття правильних рішень, тобто  $\Lambda_{11} < \Lambda_{01}$ ;  $\Lambda_{00} < \Lambda_{01}$ ,

а значення середнього ризику при прийнятті правильного рішення  $R_{i1}$  менший ніж при прийнятті неправильного рішення  $R_{i0}$ , тобто  $R_{i1} < R_{i0}$ . Тому з урахуванням виразів (6) і (7) отримаємо нерівність:

$$(\Lambda_{01} - \Lambda_{11}) \cdot P(H_i / \mathcal{C}_A) > (\Lambda_{10} - \Lambda_{00}) \cdot P(\overline{H}_i / \mathcal{C}_A) \quad (8)$$

У нерівності (2.8) можна виділити відношення правдоподібності (2.5):

$$\Pi > \frac{\Lambda_{10} - \Lambda_{00}}{\Lambda_{01} - \Lambda_{11}} = Q \quad (9)$$

Якщо правильні рішення не супроводжуються втратами, то  $\Lambda_{11} = \Lambda_{00} = 0$ . При цьому, як витикає з (9)  $\Lambda_{10} > \Lambda_{01}$ . Права частина нерівності є поріг правдоподібності гіпотез, при перевершенні якого електромагнітна обстановка по гіпотезі  $H_i$  є сприятливою, тому що система  $A$  реалізує свою цільову функцію  $\Pi_A$ .

Оскільки гіпотези  $H_i \in H$  утворюють повну групу несумісних подій, то доцільно створити ще іншу форму якості ЕМО, еквівалентну (9). З виразу (1) при урахуванні нерівності (9), отримаємо:

$$P(H_i / \Pi_A) > \frac{\Lambda_{10} - \Lambda_{00}}{\Lambda_{10} - \Lambda_{00} + \Lambda_{01} - \Lambda_{11}} = \left(1 + \frac{1}{Q}\right)^{-1} \quad (10)$$

Гіпотеза  $H_i$ , для якої виконується нерівність (10), не заважає реалізації системою  $A$  своєї цільової функції  $\Pi_A$ . Несприятливу ЕМО характеризують гіпотези, для яких нерівність (10) не виконується.

Оскільки основною задачею деякої РЕЗ є реалізація цільової функції, співвідношення (10) доцільно подати так, щоб в лівій його частині була би функція правдоподібності  $P(\Pi_A / H_i)$ . Тому на основі функції Байєса (1) співвідношення перетворимо у таке:

$$P(\Pi_A / H_i) > \left(1 + \frac{1}{Q}\right)^{-1} \cdot \frac{P(\Pi_A)}{P(H_i)}, \quad (11)$$

де  $P(\Pi_A) < P(H_i)$ .

Спростимо поріг порівняння, тобто праву частину (11). Для цього прирівняємо  $P(\Pi_A)$  до  $P(H_i)$ . Отримаємо критерій якості ЕМО відносно гіпотези  $H_i$ :

$$P(\Pi_A / H_i) > \left(1 + \frac{1}{Q}\right)^{-1} \quad (12)$$

Таким чином права частина нерівності (10) та (12) співпадають. Ті гіпотези, для яких нерівність (12) не виконується визначають несприятливу ЕМО для системи  $A$ .

Аналогічно можна оцінити якість ЕМО для системи  $B$  та  $C$ . При цьому з відповідними порогоми порівнюються умовні імовірності  $P(\Pi_B / H_{i(B)})$  та  $P(\Pi_C / H_{i(C)})$ . Між системами  $A$ ,  $B$  та  $C$  забезпечується електромагнітна сумісність, якщо для всіх гіпотез  $H_{i(A)}$ ,  $H_{i(B)}$  та  $H_{i(C)}$  виконується нерівність типу (9) – (12). З рис. 2 випливає, що реально цільова функція  $\Pi_A$  системи  $A$  може бути реалізованою лише при існуванні корисного сигналу, тобто при наявності одної з гіпотез  $H_1$ ,  $H_4$ ,  $H_6$  та  $H_7$ . При інших гіпотезах "реалізація" цілі можливе тільки у випадку помилки типу "хибної тривоги".

З урахування цих обставин у базовому критерії якості ЕМО (9) ліву частину, тобто відношення правдоподібності  $\Pi$  (5) можна трактувати як реальне співвідношення сигнал/завада на вході рецептора системи  $A$ . Тоді праву частину (9) можна трактувати як захисне відношення  $Q = \left(\frac{\text{сигнал}}{\text{завада}}\right)_{\text{вх}}$ , тобто таке мінімальне значення відношення між сигналом та завадою на вході рецептора системи, при якому система виконує свої функції з якістю, котра буде не гірше заданої.

### Висновки

На основі статистичного аналізу електромагнітної обстановки в зоні дії декількох незалежних РЕЗ побудовані статистичні гіпотези, використання яких дозволило одержати співвідношення "сигнал/завада" для роботи приймача ГНСС із заданою ймовірністю.

Запропонований підхід дослідження електромагнітної обстановки можна застосувати на багатовимірні простору випромінювань незалежних РЕЗ.

### Література

1. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами / под ред. Т. К. Тузова. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
2. Гуткин Л.С. Теория оптимальных методов радиоприема при флуктуационных помех. М.: Сов. радио, 1972.
3. Адаптивная компенсация помех в каналах связи / Ю. И. Лосев, А. Г. Бердников, Э. Ш. Гойхман, Б. Д. Сизов; под ред. Ю. И. Лосева. – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.
4. Тихонов В. И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств / В. И. Тихонов, В. Н. Харисов. – М.: Радио и связь, 2004. – 608 с.
5. Иванов В. А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств / В. А. Иванов, Л. Я. Ильинский, М. И. Фузик. – К.: Техника, 1983. – 120 с.